

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-58285

(43) 公開日 平成11年(1999) 3月2日

(51) Int.Cl.⁶

識別記号

F I

B 2 5 J 15/08

B 2 5 J 15/08

W

B 2 4 B 27/00

B 2 4 B 27/00

Z

G 1 2 B 3/08

G 1 2 B 3/08

A

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願平9-219423

(22) 出願日 平成9年(1997) 8月14日

特許法第30条第1項適用申請有り 平成9年3月5日
 社団法人精密工学会発行の「1997年度精密工学会春季大
 会 学術講演会講演論文集 第1分冊」に発表

(71) 出願人 000002107

住友重機械工業株式会社
 東京都品川区北品川五丁目9番11号

(72) 発明者 堀内 雅彦

神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63番30号 住友重
 機械工業株式会社平塚事業所内

(72) 発明者 富田 良幸

神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63番30号 住友重
 機械工業株式会社平塚事業所内

(72) 発明者 小梁川 靖

神奈川県平塚市夕陽ヶ丘63番30号 住友重
 機械工業株式会社平塚事業所内

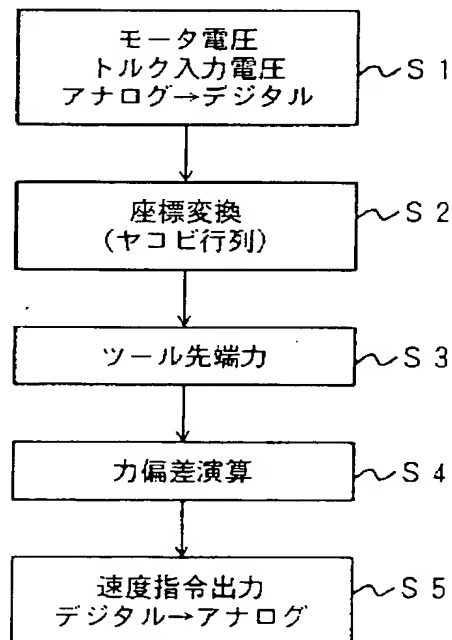
(74) 代理人 弁理士 後藤 洋介 (外1名)

(54) 【発明の名称】 ハンド機構の力制御システム

(57) 【要約】

【課題】 カセンサ等の特別な装置を付加することなく、多軸力制御を行う。

【解決手段】 モータドライバからのモータ発生トルク入力電圧をA/Dボードでデジタル信号に変換し (S 1)、外乱オブザーバを用いて駆動軸外力推定値を求める。この駆動軸外力推定値に対してヤコビ行列を用いた座標変換 (S 2) を施すことによって、ツール先端外力推定値を求める (S 3)。ツール先端外力推定値とツール先端力指令値との力偏差を求め (S 4)、この力偏差を速度指令値に変換し、速度指令値をD/Aボードでアナログ信号に変換し (S 5) てモータドライバに供給する。モータドライバは、速度指令に従ってACサーボモータを駆動する。



力制御フロー

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 ワークに対して加工を行うためのツールを持つハンド機構に用いられる力制御システムであって、前記ハンド機構は、前記ツールを一面側で保持するエンドプレートと；該エンドプレートとその他面側で離間して対向配置され、中心軸を有するベースフレームと；前記中心軸の回りに回転対称に配置されるように前記ベースフレームに取り付けられ、各々が前記エンドプレート側へ延在した駆動軸と該駆動軸を回転を阻止して伸縮する手段とをもつ N（N は 2 以上の整数）個のモータと；前記エンドプレートの他面側に一端がそれぞれ固定され、他端がそれぞれ前記 N 個のモータの前記駆動軸の先端で揺動自在に連結された N 個の関節機構とを有し、

前記力制御システムは、駆動軸力指令値と駆動軸位置とからツール先端外力推定値を求める力推定装置と、前記ツール先端外力推定値とツール先端力指令値との力偏差を求める手段と、前記力偏差を速度指令に変換する手段と、前記速度指令に従って前記モータを駆動する手段とを備えたことを特徴とするハンド機構の力制御システム。

【請求項 2】 前記力推定装置は、前記駆動軸力指令値と前記駆動軸位置とから駆動軸外力推定値を求める外乱オブザーバと、前記駆動軸外力推定値に座標変換を施して前記ツール先端外力推定値を求める座標変換手段とを有する請求項 1 に記載のハンド機構の力制御システム。

【請求項 3】 前記外乱オブザーバは、前記駆動軸力指令値の帯域制限を行ってフィルタリングされた駆動軸方向力指令値を求める手段と、前記駆動軸位置から前記ハンド機構の規範モデルの加速力推定値を求める手段と、前記規範モデルの加速力推定値と前記駆動軸方向力指令値との差から前記駆動軸外力推定値を求める手段とを有する請求項 2 に記載のハンド機構の力制御システム。

【請求項 4】 前記外乱オブザーバは、前記駆動軸力指令値の帯域制限を行ってフィルタリングされた駆動軸方向力指令値を求める手段と、前記駆動軸位置から前記ハンド機構の規範モデルの加速力推定値を求める手段と、前記駆動軸位置から摩擦トルクによる推定誤差を求める手段と、前記規範モデルの加速力推定値と前記駆動軸方向力指令値と前記推定誤差とから前記駆動軸外力推定値を求める手段とを有する請求項 2 に記載のハンド機構の力制御システム。

【請求項 5】 前記座標変換手段は、前記駆動軸外力推定値をエンドプレート外力推定値に座標変換する第 1 の座標変換手段と、前記エンドプレート外力推定値を前記ツール先端外力推定値に座標変換する第 2 の座標変換手段とから成る請求項 2 に記載のハンド機構の力制御システム。

【請求項 6】 ワークに対して加工を行うためのツールを持つハンド機構に用いられる力推定装置であって、前

記ハンド機構は、前記ツールを一面側で保持するエンドプレートと；該エンドプレートとその他面側で離間して対向配置され、中心軸を有するベースフレームと；前記中心軸の回りに回転対称に配置されるように前記ベースフレームに取り付けられ、各々が前記エンドプレート側へ延在した駆動軸と該駆動軸を回転を阻止して伸縮する手段とをもつ N（N は 2 以上の整数）個のモータと；前記エンドプレートの他面側に一端がそれぞれ固定され、他端がそれぞれ前記 N 個のモータの前記駆動軸の先端で揺動自在に連結された N 個の関節機構とを有し、

前記力推定装置は、駆動軸力指令値と駆動軸位置とから駆動軸外力推定値を求める外乱オブザーバと、前記駆動軸外力推定値に座標変換を施してツール先端外力推定値を求める座標変換手段とを有するハンド機構の力推定装置。

【請求項 7】 前記外乱オブザーバは、前記駆動軸力指令値の帯域制限を行ってフィルタリングされた駆動軸方向力指令値を求める手段と、前記駆動軸位置から前記ハンド機構の規範モデルの加速力推定値を求める手段と、前記規範モデルの加速力推定値と前記駆動軸方向力指令値との差から前記駆動軸外力推定値を求める手段とを有する請求項 6 に記載のハンド機構の力推定装置。

【請求項 8】 前記外乱オブザーバは、前記駆動軸力指令値の帯域制限を行ってフィルタリングされた駆動軸方向力指令値を求める手段と、前記駆動軸位置から前記ハンド機構の規範モデルの加速力推定値を求める手段と、前記駆動軸位置から摩擦トルクによる推定誤差を求める手段と、前記規範モデルの加速力推定値と前記駆動軸方向力指令値と前記推定誤差とから前記駆動軸外力推定値を求める手段とを有する請求項 6 に記載のハンド機構の力推定装置。

【請求項 9】 前記座標変換手段は、前記駆動軸外力推定値をエンドプレート外力推定値に座標変換する第 1 の座標変換手段と、前記エンドプレート外力推定値を前記ツール先端外力推定値に座標変換する第 2 の座標変換手段とから成る請求項 6 に記載のハンド機構の力推定装置。

【請求項 10】 モータドライバからのモータ発生トルク入力電圧を入力する処理と、

該モータ発生トルク入力電圧から駆動軸外力推定値を求める処理と、

該駆動軸外力推定値に対してヤコビ行列を用いた座標変換を施すことによって、ツール先端外力推定値を求める処理と、

外部から与えられるツール先端力指令値と前記ツール先端外力推定値との力偏差を求める処理と、

該力偏差を速度指令値に変換して出力する処理とをコンピュータに実行させるプログラムを記録したことを特徴とする記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はツールを持つロボットハンド機構に用いられる力制御システムに関し、特にロボット本体に取り付けられて、ツールによってグライнда作業や金型磨き作業等の加工作業を自動的に行う加工作業ロボットに使用されるロボットハンド機構用力制御システムに関する。

【0002】

【従来の技術】周知のように、グライнда作業は、主に、バリ取り作業とならし作業とに分類される。バリ取り作業は、形状精度を必要とし位置制御が重要となる場合と、力制御がいによってバリのみを加工する場合に分けられる。一方、ならし作業は力制御による加工方法である。

【0003】グライнда作業を行う従来技術として数値制御装置を持った工作機械（NC加工機）が広く知られている。この種のNC加工機は、ワークに対するカッター経路を数値的にプログラミング（ティーチング）し、実行（プレイバック）することで加工を行うものであり、前述の位置制御方式によるものである。このため、このようなNC加工機では、一般的に、加工力の制御を行っていない。バリの発生箇所、大きさが同種類のワークでもばらつきがあり、特に、鋳物品の場合は、鋳型の精度によって、外形寸法が異なったり、バリの発生具合も左右される。その為、このようなバリ取り作業にNC加工機を用いる場合、その都度ティーチングデータを修正する必要がある。従って、NC加工機をそのままバリ取り作業に適用するのは実用上問題がある。

【0004】次に、力制御方式による加工作業を行う従来技術について説明する。

【0005】①市販の多関節ロボットに力制御機能を持ったハンドを組み合わせる方式。この方式では、多関節ロボットの先端に、1自由度の力制御軸を持ったハンドとをシリーズに結合しているものがある。この場合、ハンド部単体では、一方向にしか加工力が制御できない。

【0006】②アーム先端と研削グライндаとの間に緩衝装置を設ける方式。この方式は、例えば、特開平6-246619号公報「研削グライнда用緩衝装置」に開示されている。この公報には、ある程度の凹凸がある加工面に対しロボットアームを直線的に移動させてもグライндаが表面形状にならって砥石を常に一定圧力で加工面に接触させることができ、円筒状加工面に対しロボットアームを回転させることなく円弧運動させることにより砥石を常に一定圧力で加工面に接触させている。すなわち、この公報に開示された研削グライнда用緩衝装置は、グライндаを構成する回転駆動機と砥石の間に伝動軸が内挿されたケーシングの外周面に球面状突起を設け、この球面状突起をロボットやマニプレータアームに取り付けたハウジング内の球面座で支持することにより、この球面座を支点として、グライндаがあらゆる方

向に揺動することができ、砥石の半径方向のどの方向から押されても、反対方向に緩衝できる構成をしている。

【0007】前記①、②の方式では、加工ツールに直接力制御用のアクチュエータが取り付けられており、そのため応答性や精度が高いという長所がある。しかしながら、上記方式では緩衝作用があるために機械剛性が低く位置制御加工ができないという問題点がある。従って、力制御のみに限定されてしまう。

【0008】③このため、前記位置制御方式と、力制御方式とを組み合わせ、ソフト的手段で切り換える方式として、市販の多関節ロボット先端部とグライндаモータ（ルールモータ）との間に力センサを設けて、多軸力制御を行う方式がある。この方式では、ある方向に力制御する場合、ロボット関節の全モータが力制御対象となる。このため、本方式は応答性が低く、動的な精度に劣る。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】上記①の方式では、3次元的な加工面に対しては、ロボット本体がハンドの姿勢を変える動作を行っている。一般に、多関節ロボットで、先端部の位置を変える場合、ロボットアーム全体を動かす関節に使用されるベース側のモータをも動作させる必要がある。したがって、小さい移動距離で高速な運動を行う場合は不利である。

【0010】また、②の方式は、砥石（ツール）に対して半径方向に加わる力のみを緩衝するものであって、あらゆる方向から作用する力を緩衝するものではない。

【0011】上記③の方式では、各関節の運動精度の誤差が積み上げられ、力制御精度の劣化要因となる。また、ロボットアーム全体を動かす関節から観ると、数十～数百kgwの全アーム重量を動かしながら、数kgf程度の先端部の加工力を制御するため、力制御の感度を高める点で不利である。さらに、力センサの機械剛性が低いために、加工作業、特に重切削作業等振動を伴う加工を行う場合には力センサの耐久性・信頼性の問題がある。

【0012】一般に多関節ロボットでは、アーム（リンク）をシリーズに結合しているため、先端部の機械剛性を高く保つことが不利な機構となっている。そこで、負荷能力（加工反力に対する堅牢さ）を高める為、ロボット本体の構造としては、大型化する傾向にある。

【0013】これらの問題に対処するため、本発明者らは、位置制御による加工と力制御による加工の両方に対応できるロボットハンド機構を既に提供している（特開平9-1491号公報）。しかしながら、その公報にはそれ用の力制御システムの具体例については何等開示していない。また、上述したように、力センサを使用すると耐久性・信頼性の点で問題があるので、力センサ等の特別な装置を付加することは好ましくない。

【0014】したがって、本発明の課題は、力センサ等

の特別な装置を付加することなく、多軸力制御を行うことができるハンド機構の力制御システムを提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、ワークに対して加工を行うためのツールを持つハンド機構に用いられる力制御システムであって、前記ハンド機構は、前記ツールを一面側で保持するエンドプレートと；該エンドプレートとその他面側で離間して対向配置され、中心軸を有するベースフレームと；前記中心軸の回りに回転対称に配置されて前記ベースフレームに取り付けられ、各々が前記エンドプレート側へ延在した駆動軸と該駆動軸を回転を阻止して伸縮する手段とをもつN（Nは2以上の整数）個のモータと；前記エンドプレートの他面側に一端がそれぞれ固定され、他端がそれぞれ前記N個のモータの駆動軸の先端で揺動自在に連結されたN個の関節機構とを有し、前記力制御システムは、駆動軸力指令値と駆動軸位置とからツール先端外力推定値を求める力推定装置と、前記ツール先端外力推定値とツール先端力指令値との力偏差を求める手段と、前記力偏差を速度指令に変換する手段と、前記速度指令に従って前記モータを駆動する手段とを備えたことを特徴とするハンド機構の力制御システムが得られる。

【0016】

【作用】本発明では、力推定装置によって駆動軸力指令値と駆動軸位置とからツール先端外力推定値を求めているので、力センサ等の特別な装置を付加することなく、多軸力制御を行うことができる。

【0017】

【発明の実施の形態】次に、本発明の実施例について図面を参照して説明する。

【0018】図2を参照して、本発明に係る力制御システムが適用されるロボットハンド機構を備えた加工作業ロボットについて説明する。加工作業ロボットは、ロボット本体1と、ロボット本体1に取り付けられたロボットハンド機構2と、ロボット本体1およびロボットハンド機構2を制御するロボットコントローラ3と、このロボットコントローラ3からのモータ発生トルク電圧にตอบสนองして、後述する演算を行い、速度指令電圧をロボットコントローラ3へ与えるホストコンピュータ4とを有する。ロボットハンド機構2は、ワーク（図示せず）に対して加工を行うためのツール2aを持つ。

【0019】図示の加工作業ロボットにおいて、ロボット本体1は4自由度で構成され、ロボットハンド機構2は3自由度で構成されている。すなわち、ロボット本体1は、固定胴体部1aと、この固定胴体部1aに対してZ軸方向に上下動可能でかつθ軸の回りに回転可能に支持された可動胴体部1bと、この可動胴体部1bに対してR軸方向に移動回転に支持されたロボットアーム1cとを有する。ロボットアーム1cはロボットハンド機構

2をT軸の回りに回転可能に支持している。一方、ロボットハンド機構2は後述するように3本の駆動軸を備え、3本の駆動軸をそれぞれH1軸、H2軸、およびH2軸方向に伸縮可能である。

【0020】図3を参照して、ロボットハンド機構2について説明する。図3において、(A)は正面図、

(B)は側面図である。ロボットハンド機構2は、ロボット本体1のロボットアーム1c（図2）に取り付けられ、ワークに対して加工を行うためのツール2aを持つ。ロボットハンド機構2はエンドプレート10と、ベースフレーム20と、第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cと、第1乃至第3の関節機構40A、40B、40Cとを有する。第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cの各々はACサーボモータで構成されている。

【0021】エンドプレート10はツール2aを一面側で保持している。エンドプレート10にはグラインダモータ50が固定されており、グラインダモータ50はツール2aを回転することにより、ワークの加工を行う。

【0022】ベースフレーム20は中心軸Oを有し、エンドプレート10とその他面側で離間して対向配置されている。ベースフレーム20はロボットアーム1c（図2）に回転可能に支持された基部21と、この基部21からエンドプレート10側へ離間して基部21と対向配置された頭部22と、基部21と頭部22との間を結合する結合部23とを有する。ベースフレーム20の頭部22には、それぞれ、第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cを第1乃至第3の支持軸A、B、Cの回りに回転可能に支持するための第1乃至第3の主軸受け24A、24B、24Cが固定されている。第1乃至第3の支持軸A、B、Cは、中心軸Oと直交する平面上で中心軸Oの回りに回転対称に配置されている。

【0023】第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cは、中心軸Oの回りに回転対称に配置されてベースフレーム20の頭部22に取り付けられている。すなわち、第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cは、それぞれの第1乃至第3の支持軸A、B、Cが正三角形の一辺をなすように配置されている。第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cの各々は、エンドプレート10側へ延在したボールネジスプライン軸（駆動軸）31を有し、ボールネジスプライン軸31を回転を阻止して伸縮する機構（図示せず）をもつ。また、第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cの各々は、ボールネジスプライン軸31の軸方向と直交する方向に延在する2本の主シャフト32を備えている。第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cの2本の主シャフト32は、それぞれ、前述した第1乃至第3の軸受け24A、24B、24C中に回転自在に支持されて、上記第1乃至第3の支持軸A、B、Cとして作用する。

【0024】第1乃至第3の関節機構40A、40B、

40Cは、エンドプレート10の他面側に一端がそれぞれ固定され、他端がそれぞれ第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cのボールネジスプライン軸31の先端で揺動自在に連結されている。換言すれば、第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cのボールネジスプライン軸31は、3つの回転自由度をもつ第1乃至第3の関節機構40A、40B、40Cを介してエンドプレート10に接続されている。第1乃至第3の関節機構40A、40B、40Cの各々は、ボールネジスプライン軸31の先端にその軸の回りに回転自在に連結されたコ字型の第1のフレーム41と、エンドプレート10の他面側に固定されたコ字型の第2のフレーム42とを有する。

【0025】図4を参照して、ロボットハンド機構コントローラの構成について説明する。前述したように、ロボットハンド機構2は第1乃至第3の直動機構30A、30B、30Cとしての3台のACサーボモータ5を有する。ロボットコントローラ3はこれら3台のACサーボモータ5を制御するための3台のモータドライバ6を含む。ホストコンピュータ4はA/Dボード7とD/A

10

20

ボード8とカウンタボード9を含む。

【0026】モータドライバ6から出力されているモータ発生トルク電圧はA/Dボード8を介してホストコンピュータ4内に取り込まれる。ホストコンピュータ4では、モータ発生トルク電圧に基づいて、外乱オブザーバ（後述）を用いて力を推定し、座標変換（後述）を行うことにより、ツール先端力を算出する。この算出したツール先端力をフィードバックすることで、力制御を行

う。

【0027】図1にホストコンピュータ4で実行される、本発明に係る力制御フローを示す。まず、モータドライバ6からのモータ発生トルク入力電圧をA/Dボード7でデジタル信号に変換し（ステップS1）、後述する外乱オブザーバを用いて駆動軸外力推定値を求める。この駆動軸外力推定値に対してヤコビ行列を用いた座標変換（ステップS2）をするによって、ツール先端外力推定値を求める（ステップS3）。ツール先端外力推定値とツール先端力指令値との力偏差を求め（ステップS4）、この力偏差を速度指令値に変換し、速度指令値をD/Aボード8でアナログ信号に変換し（ステップS5）てモータドライバ6に供給する。モータドライバ6は、速度指令に従ってACサーボモータ5を駆動する。

【0028】図5を参照して、ハンド機構2に使用される位置制御系について説明する。図示の位置制御系は、各ACサーボモータ5毎に独立した制御系として構成される。位置制御系は、位置コントローラ60とツール先端/モータ位置変換器70とを有する。位置コントローラ60は、モータ位置/モータ回転角変換器61と、減算器62と、PI補償器63とを有する。ツール先端/モータ位置変換器70は、ツール先端/エンドプレート位置変換器71とエンドプレート/モータ位置変換器72とを有する。尚、下記の表1には、左欄に図5に示す位置制御系における各種記号を、右欄にその意味を示してある。

【0029】

【表1】

$X_t = (x_t, y_t, z_t)^T$: ツール先端位置

X_t^{ref} : ツール先端位置指令値

X_E^{ref} : エンドプレート位置指令値

$X_A = (l_1, l_2, l_3)^T$: 駆動軸長さ

X_A^{ref} : 駆動軸長さ指令値

\dot{X}_A^{ref} : 駆動軸速度指令値

X_A^{fbk} : 駆動軸長さフィードバック値

K_p : 比例ゲイン

K_i : 積分ゲイン

${}^A T_E$: エンドプレート位置からモータ位置への変換行列

${}^E T_t$: ツール先端位置からエンドプレート位置への変換行列

K_{pg} : モータ回転角から駆動軸長さへの変換係数

θ_{ref} : モータ回転角指令値

$\dot{\theta}_{ref}$: モータ回転角速度指令値

θ_{fbk} : モータ回転角フィードバック値

【0030】 ツール先端／モータ位置変換器 70 において、ツール先端／エンドプレート位置変換器 71 はツール先端位置指令値をエンドプレート位置指令値に変換する。エンドプレート／モータ位置変換器 72 はエンドプレート位置指令値を駆動軸長さ指令値に変換する。位置 40
コントローラ 60 において、モータ位置／モータ回転角変換器 61 は駆動軸長さ指令値をモータ回転角指令値に変換する。減算器 62 はモータ回転角指令値からモータ*

* 回転角フィードバック値を差し引いて、角度偏差を出力する。PI 補償器 63 は角度偏差からモータ回転角速度指令値を求める。このモータ回転角速度指令値はモータドライバ 6 に供給される。

【0031】 図 5 に示した位置制御系に於ける一連の制御演算を下記の数 1 式に示す。

【0032】

【数 1】

$$\dot{X}_A^{ref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot ({}^A T_E \cdot {}^E T_t \cdot X_t^{ref} - X_A^{fbk})$$

【0033】 すなわち、図 5 に示すように、ツール先端位置指令値に対して変換行列 ${}^E T_t$ による座標変換を施してエンドプレート位置指令値を算出する。さらに、エンドプレート位置指令値に対して変換行列 ${}^A T_E$ による 50

座標変換を施して駆動軸長さ指令値を算出する。この駆動軸長さ指令値に対して変換係数 $(K_{pg})^{-1}$ による変換を施してモータ回転角指令値を算出する。ハンド機構 2 に備えられているエンコーダ (図示せず) から出力より

モータ回転角フィードバック値を演算し、モータ回転角指令値とモータ回転角フィードバック値との偏差演算より角度偏差を求め、この角度偏差からモータ回転角度指令値を求めてそれをモータドライバ 6 に出力する。これにより、位置制御を行う。

【0034】図 6 に本発明に係る力制御システムに使用される外乱オブザーバを用いた力推定装置を示す。図示の力推定装置 80 は外乱オブザーバ 90 と力座標変換器 100 とから成る。外乱オブザーバ 90 は第 1 および第*

* 2 のフィルタ 91 および 92 と減算器 93 と位置演算器 94 とから成る。力座標変換器 100 は駆動軸／エンドプレート力変換器 101 とエンドプレート／ツール先端力変換器 102 とから成る。尚、下記の表 2 には、左欄に図 6 に示す力推定装置における各種記号を、右欄にその意味を示してある。

【0035】

【表 2】

F_A^{ref}	: 駆動軸力指令値
F_d	: 外乱力
X_A	: 駆動軸位置
\hat{f}_{d1}	: 駆動軸方向力推定値
\hat{f}_{d2}	: 規範モデルの加速力推定値
\hat{F}_A	: 駆動軸外力推定値
\hat{F}_E	: エンドプレート外力推定値
\hat{F}_t	: ツール先端外力推定値
J^{AE}	: 駆動軸とエンドプレート間のヤコビ行列
J^{TE}	: エンドプレートとツール先端間のヤコビ行列
$G_{obs}(s)$: 外乱オブザーバの伝達関数
M_n	: 規範モデルの重量
D_n	: 規範モデルの粘性係数
ζ_{obs}	: オブザーバ演算フィルタ減衰係数
ω_{obs}	: オブザーバ演算フィルタカットオフ周波数

【0036】外乱オブザーバ 90 において、第 1 のフィルタ 91 は駆動軸力指令値に 2 次フィルタを施し、帯域の制限を行ってフィルタリングされた駆動軸方向力指令値を求める。位置演算器 94 はモータ 5 の回転変位から駆動軸位置を求める。第 2 のフィルタ 92 は、駆動軸位置から制御対象であるハンド機構 2 の規範モデルを用いて、規範モデルの加速力推定値を求める。減算器 93 は規範モデルの加速力推定値から駆動軸方向力指令値を差

し引いて、駆動軸外力推定値を求める。力座標変換器 100 において、駆動軸／エンドプレート力変換器 101 は駆動軸外力推定値に対して座標変換を施してエンドプレート外力推定値を求める。エンドプレート／ツール先端力変換器 102 はエンドプレート外力推定値に対して座標変換を施してツール先端外力推定値を求める。

【0037】なお、この外乱推定には、測定雑音を考慮に入れて、2 次フィルタにより帯域の制限を行ってい

る。また、外乱オブザーバ 9 0 内の第 1 および第 2 のフ
ィルタ 9 1 および 9 2 の制御規則はそれぞれ下記の数 2
式および数 3 式で表される。

* 【0 0 3 8】

【数 2】

*

$$\hat{f}_{d1} = G_{obs}(s) F_A^{ref} = \frac{\omega_{obs}^2}{s^2 + 2\zeta_{obs}\omega_{obs}s + \omega_{obs}^2} F_A^{ref}$$

【数 3】

$$\begin{aligned} \hat{f}_{d2} &= G_{obs}(s)(M_n s^2 + D_n s) X_A \\ &= \frac{\omega_{obs}^2}{s^2 + 2\zeta_{obs}\omega_{obs}s + \omega_{obs}^2} (M_n s^2 + D_n s) X_A \end{aligned}$$

外乱オブザーバ 9 0 内の減算器 9 3 は下記の数 4 式に従
って駆動軸外力推定値を求める。

【0 0 3 9】

【数 4】

$$\hat{F}_A = \hat{f}_{d2} - \hat{f}_{d1}$$

以上の結果、外乱力は下記の数 5 式により推定される。

【0 0 4 0】

【数 5】

$$\hat{F}_A = G_{obs}(s) \cdot F_d$$

【0 0 4 1】図 7 に図 6 に示した外乱推定装置を利用し
た本発明に係る力制御系を示す。但し、この外乱推定装
置 8 0 A には、外乱オブザーバ 9 0 A に摩擦補償器 9 5 ※

※が付加されている。この摩擦補償器 9 5 は、ボールネジ
の摩擦トルクによる推定誤差を、キャリブレーションに
より補正するためのものである。

【0 0 4 2】図示のカコントローラ 1 1 0 は、外乱推定
装置 8 0 A の他に、減算器 1 1 1、P I 補償器 1 1 2、
20 ツール先端/エンドプレート力変換器 1 1 3、エンドプ
レート/駆動軸力変換器 1 1 4、および増幅器 1 1 5 を
有する。

【0 0 4 3】上記表 1 および 2 に示すものの他に、下記
の表 3 には、左欄に図 7 に示すカコントローラ 1 1 0 に
おける各種記号を、右欄にその意味を示してある。

【0 0 4 4】

【表 3】

F_t^{ref}	: ツール先端力指令値
F_E^{ref}	: エンドプレート力指令値
F_A^{ref}	: 駆動軸力指令値
K_{VF}	: 力指令ゲイン
K_p^F	: 比例ゲイン
K_i^F	: 積分ゲイン
K_t	: モータトルクから駆動軸方向への変換係数

【0 0 4 5】カコントローラ 1 1 0 において、減算器 1
1 1 はツール先端力指令値からツール先端外力推定値を
差し引いて、力偏差を求める。P I 補償器 1 1 2 は力偏
差から補償演算値を求める。ツール先端/エンドプレート
力変換器 1 1 3 は補償演算値をエンドプレート力指令 50

値に変換する。エンドプレート/駆動軸力変換器 1 1 4
はエンドプレート力指令値を駆動軸力指令値に変換す
る。増幅器 1 1 5 は駆動軸力指令値を力指令ゲインで増
幅してモータ回転角速度指令値を求める。

【0 0 4 6】図 7 に示したカコントローラ 1 1 0 の制御

則を下記の数 6 式に示す。

【0047】

* 【数 6】

$$\dot{X}_A^{ref} = K_{VF} \left([J^{AE}]^T \cdot [J^{TE}]^T \right) \left(K_p^F + \frac{K_I^F}{s} \right)$$

$$[F_t^{ref} - ([J^{TE}]^T)^{-1} \cdot ([J^{AE}]^T)^{-1} \cdot \hat{F}_A]$$

【0048】すなわち、前述した力推定装置により推定したツール先端での外力値をフィードバック値とし、ツール先端力指令値と偏差演算を行い、速度指令に変換し、モータドライバ 6 に出力することにより、力制御を行う。

【0049】図 8 にハンド機構 2 に適用される位置と力のハイブリット制御系を示す。図示のハイブリット制御系は、前述の位置制御系と外乱オブザーバを用いた力制御系とを同時に且つ独立に構成したものである。位置

※コントローラ 60 から出力されるモータ回転角速度指令値と力コントローラ 110 から出力されるモータ回転角速度指令値とを加算器 121 で加算し、その速度指令値の和をモータドライバ 6 に供給することにより、位置と力のハイブリット制御を行う。全体の制御則は下記の数 7 式で表される。

【0050】

【数 7】

$$\dot{X}_A^{ref} = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot (A_{TE} \cdot E_{T_t} \cdot X_t^{ref} - X_A^{fbk})$$

$$+ K_{VF} \cdot [J^{AE}]^T \cdot [J^{TE}]^T \left(K_p^F + \frac{K_I^F}{s} \right)$$

$$[F_t^{ref} - ([J^{TE}]^T)^{-1} \cdot ([J^{AE}]^T)^{-1} \cdot \hat{F}_A]$$

【0051】尚、ハンド機構 2 からの駆動軸長さフィードバック値はハンドの剛性 122 により実際の位置に変換され、この実際の位置は減算器 123 によってワーク位置を差し引かれ、その位置の差は接触スチフネス 124 によって実際の力に変換される。

【0052】このような構成の位置と力のハイブリット制御系によれば、加工ワークの形状のバラつきに左右されることなく、バリ取り・ならし作業を行うことができる。また、教示作業中において、ツール 2a の先端の力を前述した力推定装置により推定し、監視することにより、教示対象に接触したことを検知することができる。これにより、微調整をすることなく教示を行うことができ、教示作業の時間を短縮することが可能となる。

【0053】図 9 および図 10 に、図 8 に示した位置と力のハイブリット制御系によってワークを加工した加工例を示す。図 9 および図 10 の各々において、(a) は加工前および加工後の加工面を示し、(b) は加工方法を示し、(c) は加工時の力推定値を示す。

【0054】図 9 はツール 2a として超硬バーを用いてバリ取り加工を行った例（加工例 1）である。図 9

(b) に示すように、ワークの面に水平な方向に位置制

を行った。図 9 (a) に示すように、バリが綺麗に取れていることが分かる。

【0055】図 10 はツール 2a として図 9 の場合よりもシャンク部の長い超硬バーを用いてバリ取り加工を行った例（加工例 2）である。図 10 (b) に示すように、ワークに接触する 2 面で力制御を行い、ワークも下面から上面に向かって位置制御を行うことにより、図 10 (a) に示すようなコーナ部分の加工を行った。

【0056】なお、ホストコンピュータ 4 で実行される、図 1 に示した力制御フローを実現するプログラムは、記録媒体（図示せず）に記録されていても良い。ここで、「記録媒体」とは、プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体のことをいい。具体的には、CD-ROM、プレキシブル・ディスクなどの磁気ディスク、半導体メモリなどを含む。さらに、記録媒体はプログラムを記録した紙でも良い。この場合には、コンピュータは OCR（光学的文字読取装置）のような読取装置と、この読取装置で読み取った文字（コード）をコンピュータが認識できる機械言語に翻訳するコンパイラとを備えていれば良い。とにかく、記録媒体に記録されたプログラムをコンピュータにインストールすることによって、コンピュータに所定の処理を行わせることが

できる。

【0057】本発明は上述した実施の形態に限定せず、本発明の趣旨を逸脱しない範囲内で種々の変形・変更が可能である。例えば、上記実施の形態では自由度が3の平行メカニズムに適用した例を示しているが、自由度が4以上の平行メカニズムにも適用できるのは勿論である。また、平行メカニズムばかりでなく、シリアルリンク機構にも適用できる。加工作業もバリ取りに限定されず、研磨・研削等の他の加工作業や、精密部品等の組み立て作業にも応用できる。

【0058】

【発明の効果】以上説明したように本発明は、力推定装置によって力を推定しているため、力センサなどの特別な装置を付加することなく、力の検出・制御が可能である。また、ツール先端力の制御を行うので、ワークの形状に倣いながらワークを加工することが可能である。そのため、ワーク毎に教示データを作成する必要がない。ハンド機構で複数の方向の力制御を行うことができるので、ロボット本体（ベース部分）の姿勢を変えることなく、3次元形状のワークの加工を行うことができる。さらに、力・位置をそれぞれ直交座標系で目的に応じて、ハンド機構の特性を自在に制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施の形態に係るハンド機構の力制御方法を示すフロー図である。

【図2】本発明が適用される加工作業ロボットの全体構成を示す正面図である。

【図3】図2に示す加工作業ロボットに使用されるハンド機構を示す図で、(A)は正面図、(B)は側面図である。

【図4】図3に示したハンド機構を制御するためのハンド機構コントローラの構成を示す模式およびブロック図である。

【図5】図3に示したハンド機構用の位置制御系を示すブロック線図である。

【図6】本発明に係る力制御系に用いられる力推定装置を示すブロック図である。

【図7】本発明の一実施の形態に係る、図3に示したハンド機構用の力制御系を示すブロック線図である。

10 【図8】図3に示したハンド機構用の位置と力のハイブリット制御系を示すブロック図である。

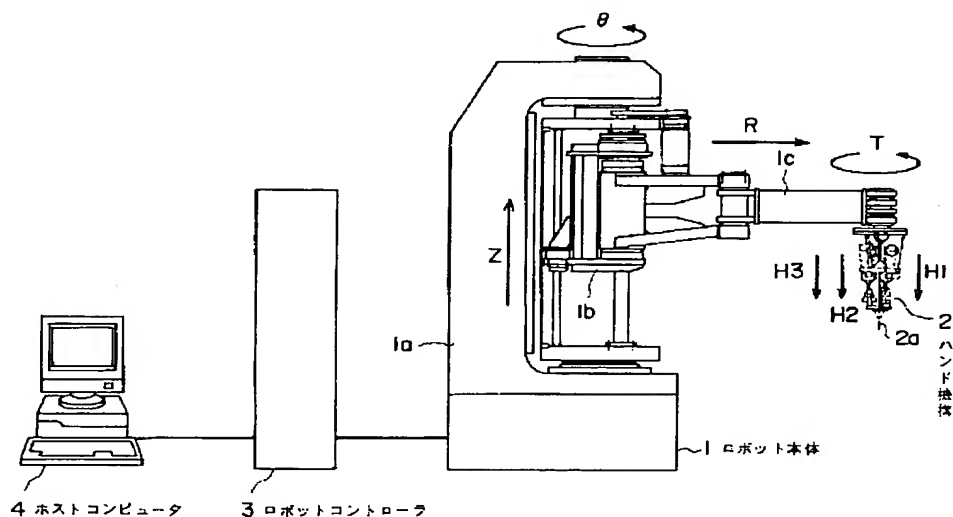
【図9】図8に示したハイブリット制御系による加工例1を示す図である。

【図10】図8に示したハイブリット制御系による加工例2を示す図である。

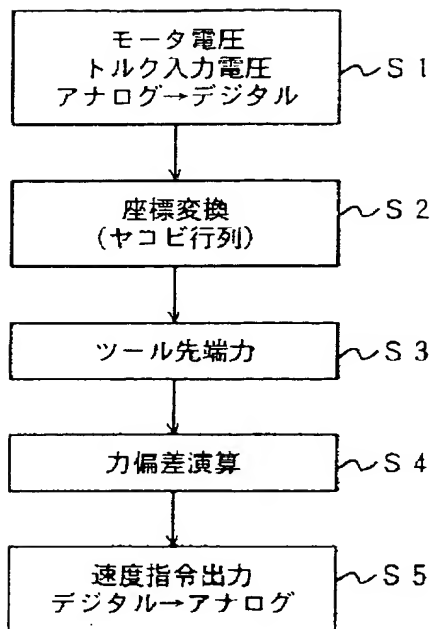
【符号の説明】

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1 | ロボット本体 |
| 2 | ハンド機構 |
| 2 a | ツール |
| 3 | ロボットコントローラ |
| 4 | ホストコンピュータ |
| 5 | ACサーボモータ |
| 6 | モータドライバ |
| 10 | エンドプレート |
| 20 | ベースフレーム |
| 30 A, 30 B, 30 C | 直動機構 (ACサーボモータ) |
| 31 | ボールネジスプライン軸 (駆動軸) |
| 40 A, 40 B, 40 C | 関節機構 |
| 50 | グラインダモータ |

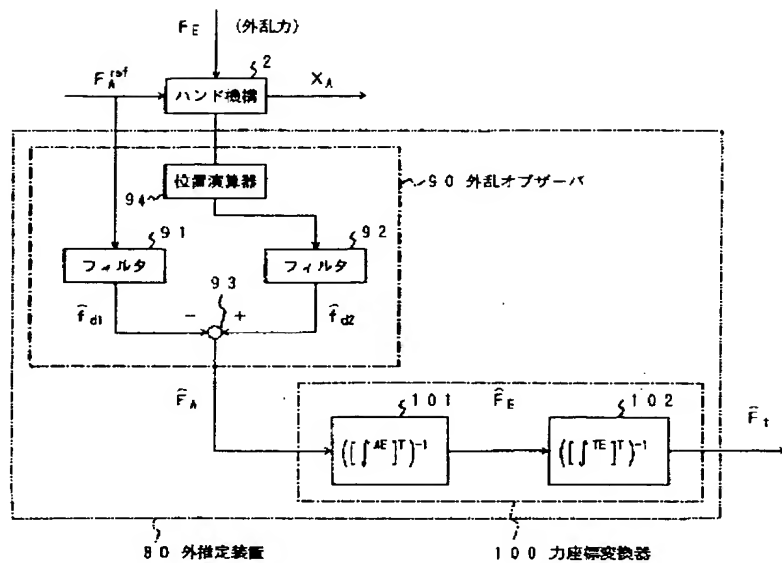
【図2】



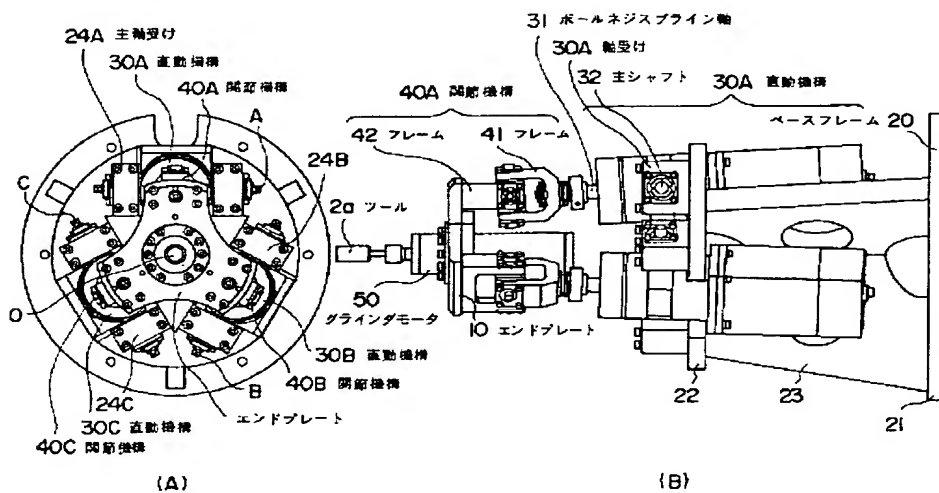
【図 6】



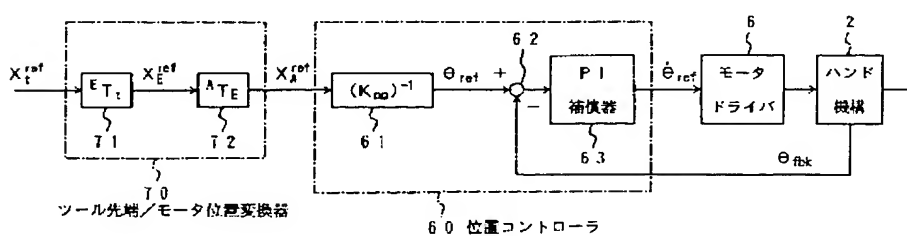
力制御フロー



【図 3】



【図 5】



The diagram illustrates a control system for a motor and hand mechanism. The system is divided into two main sections: a control loop (100) and a hand mechanism (90).

Control Loop (100):

- The input F_A^{ref} is fed into a summing junction (111).
- The output of the summing junction is fed into a PI controller (112).
- The output of the PI controller is fed into a coordinate transformation block (113).
- The output of the coordinate transformation block is fed into a feedforward block (114).
- The output of the feedforward block is fed into a gain block (115).
- The output of the gain block is fed into the motor driver.
- The motor driver outputs $\dot{\theta}_{ref}$ to the hand mechanism.
- The hand mechanism outputs X_A^{nk} to the control loop.
- The output X_A^{nk} is fed back to the summing junction (111) with a negative sign.

Hand Mechanism (90):

- The hand mechanism receives $\dot{\theta}_{ref}$ from the motor driver.
- The hand mechanism includes a position detector (94) that outputs θ^{nk} .
- The position detector (94) is fed into a filter (91).
- The output of filter (91) is fed into a summing junction (93).
- The summing junction (93) also receives \hat{f}_d from a filter (92).
- The output of the summing junction (93) is fed into a display device (95).
- The display device (95) outputs X_A .
- The output X_A is fed back to the control loop (100).

Other Components:

- The control loop (100) also includes a block (101) that receives \hat{f}_d from the display device (95) and outputs \hat{f}_d to the summing junction (93).
- The control loop (100) also includes a block (102) that receives \hat{f}_d from the display device (95) and outputs \hat{f}_d to the summing junction (93).
- The control loop (100) also includes a block (103) that receives \hat{f}_d from the display device (95) and outputs \hat{f}_d to the summing junction (93).

【図 8】

